

レーザーの進歩が 特殊光学コーティング開発の原動力

チェンダ・シャオ、クイ・イ、ユアナン・チャオ、ヤンチ・ワン、メイピン・チュ

レーザー技術の進歩が光学コーティングの新たな発展を後押ししてきたが、次世代のハイパワーシステム、超高速システム、人工衛星搭載レーザーシステムへの搭載に成功するには、コーティングの光学的、機械的特性は、進化を続けなければならない。

近年のレーザー技術の急速な改善が光学コーティングの無類の進歩を後押ししてきた。種々のレーザーシステムのコーティングには、様々な仕様と要件がある。これには、ある波長域の透過・反射値、低波面歪曲、高いレーザー損傷閾値が含まれる。

所望のスペクトルパフォーマンスを得る最初のステップは、まずは厳しいコーティング設計である。また、高度な商用設計ソフトウェアで特殊なスペクトルパフォーマンスを達成できるとは言え、ハイパワーレーザーアプリケーション向けのコーティングでは高いレーザー誘起損傷閾値(LIDT)と低いコーティングひずみが達成されなければならない。

中国・長春にある中国科学院(CAS)に誕生したグループは、1964年に上海に移動し中国科学院上海光学精密機械研究所(SIOM, CAS)の基盤となり、さらに光学薄膜コーティングR&Dセンターの前進となった。同センターは現在、高出力レーザー用材料の主要研究所グループであり、進化する光学コーティングに取り組んでいる。特に、ハイパワー、超高速、人工衛星搭載レーザーシステム向けのコーティングである。

ハイパワーレーザーコーティング

1970年代から光学コーティングに対する電界と温度場分布の効果を調べ、

酸化ハフニウム・二酸化ケイ素($\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$)多層コーティングには、 HfO_2 層においては電界ピーク値が低いほど、また空気界面から離れて最強の電界層を置く、ますますレーザー誘起損傷閾値(LIDT)が高くなることを実証した⁽¹⁾、⁽²⁾。機械強度を改善し、避けられない損傷形態を抑制するためにコーティングデザインにはオーバーコート層とアンダーコート層も用いた。こうしてLIDTが改善された⁽³⁾。

多層コーティングにおける全応力は、個々のコーティング材料と界面の応力に起因するものである。各材料の応力は様々なので、異なるコーティング材料の厚さ比の調整は全コーティング応力を調和させる方法となる。したがって、われわれの系統的なコーティング設計法には、スペクトルパフォーマンスの最適化、電界分布、アンダーコート層とオーバーコート層が含まれ、コーティング層内の応力も調和される。

コーティング設計と製造工程中、所望のスペクトルパフォーマンスを得るには綿密な層厚制御が最も重要である。われわれの光モニタリングアプローチは、観察ガラスを使う。これは特別に選択した順序で計測位置を示してくれる。厚さ誤差を減らすために、厚い層の中には2層に分けて、別の観察ガラスでモニタするものもある。提案

した方法で、理論設計に近いスペクトルパフォーマンスが達成可能になる。

レーザー誘起損傷閾値(LIDT)改善のために、レーザー損傷の起源を理解することが重要である。欠陥はレーザー照射下のコーティング損傷に関与している⁽⁴⁾。一般的には、欠陥密度を減らし欠陥に対するレーザー損傷耐性を高めるのがLIDT改善の効果的な方法であり、したがって製造工程に関わる各ステップをよく観察する必要がある。

基板ハンドリングとクリーニングプロセスを例として使用すると、基板研磨工程で誘発されるナノスケール吸収欠陥が反射防止膜やビームスプリッタコーティングのLIDTを大きく劣化させる可能性があるが、基板の幾何学的構造が高反射率コーティングで内部亀裂や電界強化をもたらすこともあり、これが結果的にコーティングのLIDTを低下させることになる⁽⁵⁾、⁽⁶⁾。基板に起因する欠陥を減らすには、コーティングチャンバの外および内部のそれぞれで基板を洗浄するために、超音波洗浄やプラズマイオン洗浄を用いる。

基板の問題だけでなく、コーティング材料の噴出も重要な欠陥起源となる。コーティング材料の前溶解プロセスを最適化することにより、また HfO_2 の代わりに金属ハフニウムを出発材料として用いると、材料噴出は大幅に減

らせる。

欠陥のレーザー損傷耐性を改善するために、相対的に高い酸素流と低速蒸着の利用がコーティング酸化に対して有利になる。最近、多層界面特性改善とコーティング応力解放のために共蒸着界面を提案した⁽⁷⁾。レーザー調整および酸素プラズマ処理を含む後処理工程も、LIDT強化に用いた⁽⁸⁾。

光波面歪曲は、基板の表面形状、多層コーティングの応力コントロール、計測や運転環境によって大きく左右される。膜蒸着プロセス中の応力の発展を理解しコントロールするために、われわれは、あるがままの状態の応力計測システムを構築した。これは、2つのレーザービームの光偏向で計測されるウエハ湾曲に基づいている。このシステムは、蒸着パラメータを調整することによりコーティング応力をデチューンすることができる。

大開口コーティング

大開口ブラスター角偏光子コーティングおよびミラーコーティングは、中国のSG (Shenguang: 神光) シリーズレーザーファシリティのビーム操作に必要とされている。このファシリティは、米国の国立点火施設 (NIF) やフランスのレーザメガジュール (LMJ) と同類である。従来の電子ビーム蒸着技術と組み合わせたプラズマイオンアシスト蒸着 (PIAD) 技術は、大開口コーティングの準備に使うことができる。大開口サイズに拡張でき、高LIDTを維持しながら光学コーティングの膜応力を調整できるからである。

SIOMが開発したブラスター角偏光子は、SPIE 2012で開催された国際レーザー損傷コンペ (International Laser Damage Competition)、米コロラド州ボルダーで開催された2013 高出力レーザー



図1 SG II-UP向けの大開口偏光子(最大直径900mm)。

用光学材料レーザー損傷シンポジウム (Laser Damage Symposia on Optical Materials for High-Power Lasers) に収録されていた (www.spie.org/conferences-and-exhibitions/laser-damage 参照)。われわれのサンプル (41.7 J/cm^2) のs偏向LIDTは最高のものであり、最高値(テスト誤差範囲内)との比較でわずか 1 J/cm^2 低かった。また、われわれの 29.8 J/cm^2 p偏向LIDTは、2012年に提出されたサンプルの最高成果であった。

今日まで、98%を上回るp偏向透過大開口偏光子を製造しており、s偏向反射率は1053nmで99%を超え、 14 J/cm^2 (5nsパルス幅) よりも高いレーザーフルエンスに耐えることができる。直径900mmまでの大開口偏光子はSG II-UPレーザーシステム用に製造され、1053nmで99.5%を超える反射率の大開口トランスポートミラーも製造されている。これは、 30 J/cm^2 (パルス幅5ns: 図1) よりも高いレーザーフルエン

スに耐えることができる。

超高速レーザーコーティング

チャープミラー (CM) ペアや高分散ミラー (HDM)、低分散ミラー (LDM) など、分散制御された分散ミラーは、超高速レーザーシステムの分散マネジメントにとって不可欠の光学部品である。

「ネガティブチャープ」または「ポジティブチャープ」のいずれかであるので、CMペアは、特にブロードバンド領域でポジティブまたはネガティブ分散を補償するために広範に用いられてきた。ブロードバンドCMペア設計のために局所最適化とニードル最適化をベースにした統合的方法が提案されているが、予備設計に層厚調整法が利用されている。イオンビームスパッタリング技術を用い、700~1400nmで高反射率 (>99.5%)、505~540nmで高透過率 (>99%)、群遅延分散 (GDD) を 100 fs^2 程度に調整したCMペアが作製

された。

これらCMのレーザー誘起損傷挙動は、800nm、38fs レーザを用いて調べた。多波長結合イオン化モデルを用いてレーザー誘起損傷挙動を説明することができる。これはフェムト秒レーザー照射下の損傷メカニズムの理解に役に立つ⁽⁹⁾。

チャープミラー (CM) とジル・トルノア干渉計 (GTI) ミラーの特性を統合した高分散ミラー (HDM) も、波長範囲 1030~1050nm で -2500fs² 程度の GDD、1050~1056nm では、-10000fs² 程度の GDD で作製された (図2)。-2500 fs² GDD の HDM で 8 回反射した後、パルスは 1.5ps から 150fs に圧縮できる。

広帯域、高反射率 LDM もハイパワーレーザーシステムへの分散増加を避けるために役立つ。これら低分散ミラー (LDM) は、700~900nm (45°, s 偏向) で高反射率 (>99.5%) とともに、ほぼゼロ GDD を達成することができ、5 PW レーザで導入に成功している⁽¹⁰⁾。

人工衛星搭載レーザーコーティング

宇宙応用向けのコーティングは、高/低変温の真空環境で信頼性が高くなければならない。また、長期の放射線照射効果に耐えることができなければならない。チャンの月探査ミッション用にチャンの一連のレーザー高度計をサポートする目的で、われわれは真空、汚染、温度サイクル、特殊宇宙環境向けに最適化された蒸着パラメータを持つコーティングパフォーマンスへの長期間照射を調べ、成功を確認した (図3)。

過去 50 年で、レーザーコーティングでは急速な進歩が見られた。応力緩和や界面層欠陥の抑制などのレーザー誘起損傷の理解を深めることで、レーザーコーティング技術はさらに進歩し、一段と進化して、次世代のレーザー技術では一層の前進が促進されることになる。

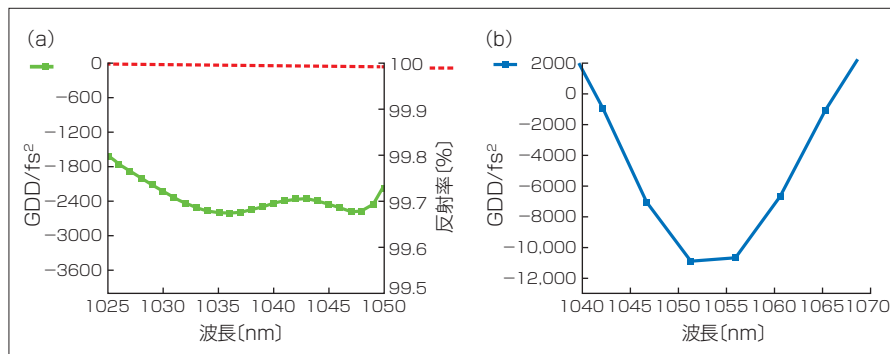


図2 群遅延分散(GDD)は、2つの異なる高分散ミラー(HDM)サンプルでプロットされている。1つは、1030~1050nmで約-2500fs²のGDD(a)、もう1つは1050~1056nmで-10000 fs²を超える高いGDD(b)。

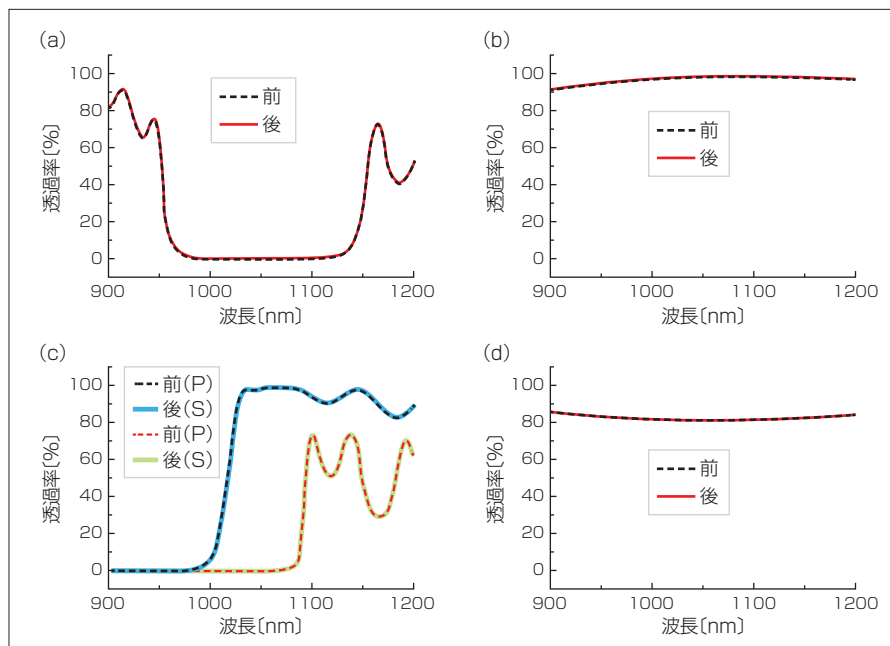


図3 様々なコーティングの透過スペクトルを高/低温度サイクルテストの前後で計測。(a)は高反射率コーティング、(b)は反射防止コーティング、(c)は偏向コーティング、さらに(d)は部分反射コーティング。

参考文献

- (1) Z. Fan et al., "Temperature field design of optical thin film coatings," Proc. SPIE, 2966, 362-370 (1997).
- (2) M. Zhu et al., Appl. Surf. Sci., 257, 15, 6884-6888 (2011).
- (3) M. Zhu et al., Opt. Commun., 319, 0, 75-79 (2014).
- (4) M. Zhou et al., Opt. Express, 17, 22, 20313-20320 (2009).
- (5) Y. Chai et al., Opt. Lett., 40, 16, 3731-3734 (2015).
- (6) Y. Chai et al., Opt. Lett., 40, 7, 1330-1333 (2015).
- (7) H. Xing et al., Opt. Lett., 41, 6, 1253-1256 (2016).
- (8) D. Zhang et al., Opt. Lett., 29, 24, 2870-2872 (2004).
- (9) S. Chen et al., Appl. Phys. Lett., 102, 8 (2013).
- (10) Y. Chu et al., Opt. Lett., 40, 21, 5011-5014 (2015).

著者紹介

チェンダ・シャオは、中国科学院上海光学精密機械研究所 (SIOM, CAS) の副部長、クイ・イは、SIOM, CAS、ハイパワーレーザー用材料の主要研究所副部長、ユアナン・チャオは教授、ヤンチ・ワンとメイピン・チュは、中国上海ハイパワーレーザー用材料の主要研究所の光学薄膜コーティング R & D センター准教授。e-mail: bree@siom.ac.cn URL: <http://english.siom.cas.cn>